

## 径向膨胀流的同位旋效应\*

陈列文<sup>1,2</sup> 张丰收<sup>1,2,3</sup> 靳根明<sup>1,2</sup> 刘建业<sup>1,2</sup> 朱志远<sup>1,4</sup>

1 (兰州重离子加速器国家实验室原子核理论研究中心 兰州 730000)

2 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

3 (中国高等科学技术中心 北京 100080)

4 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

**摘要** 利用同位旋相关的量子分子动力学模型,研究了 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 两个系统在不同入射能量下对心碰撞的径向膨胀流.发现丰中子系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 的径向膨胀流系统性地小于系统 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 的径向膨胀流.同时发现这种差别主要来自于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性而几乎与对称能无关.

**关键词** 同位旋相关的QMD模型 径向膨胀流 核子-核子碰撞截面 对称能

### 1 引言

中高能重离子碰撞为研究高温高密条件下的核物质性质提供了一种崭新的途径.人们已经做了大量的实验与理论工作来探索核物质的状态方程(EOS)<sup>[1]</sup>、液汽相变<sup>[2,3]</sup>及介质中的核子-核子碰撞截面<sup>[4,5]</sup>.近年来,随着次级束流装置,如RIKEN的RIPS<sup>[6]</sup>, GSI的FRS<sup>[7]</sup>, GANIL的LISE、SISSI和SPIRAL<sup>[8]</sup>, MSU的A1200<sup>[9]</sup>和HIRFL的RIBLL<sup>[10]</sup>相继建成并投入使用,重离子物理开辟了一个崭新的领域,即放射性核束(RNB)物理.放射性核束物理的建立,为人们探索核物质状态方程的同位旋相关部分(即对称能)及同位旋相关的介质中的核子-核子碰撞截面提供了可能.另外,通过研究远离 $\beta$ 稳定线核引起的核反应及其与同位旋相关的输运理论模型<sup>[11-13]</sup>之间的比较,人们还可以探索同位旋相关的反应动力学.

事实上,直到今天人们仍然未能很好地确定核的对称能以及介质中的核子-核子碰撞截面的同位旋相关性.对称能对于理解远离 $\beta$ 稳定线核的结构以及中子星、超新星的结构和性质起着决定性的作用.为了研究核的对称能,人们利用同位旋相关的BUU模型已经证明<sup>[11]</sup>:在费米能区,丰中子核引起的反应中前平衡发射的中子质子比敏感地依赖于核的对称能的密度相关形式,而与核物质的不可压缩系数及介质中的核子-核子碰

1998-12-16 收稿

\* 国家自然科学基金(19609033、19875068和19847002),中国科学院科学基金和国家教委基金资助项目

撞截面无关. 于是为确定核的对称能提供了一条新的途径. 介质中的核子-核子碰撞截面的同位旋相关性对于探索中高能重离子碰撞中的同位旋效应起着非常重要的作用, 相对而言, 人们对它了解得更少. 通常在同位旋相关的输运理论模型中使用的是实验提取的自由空间同位旋相关的核子-核子碰撞截面, 介质效应仅仅通过泡利阻塞效应来模拟. 事实上, 核子-核子碰撞截面及其同位旋相关性可能存在着强烈的密度相关<sup>[14]</sup>.

核的集体流是近十年来实验与理论核物理学家都非常感兴趣的研究课题之一, 总结性的文章见文献[15]. 近年来, 人们在重离子近中心碰撞中还发现了所谓的径向膨胀流<sup>[16-21]</sup>. 中心碰撞具有其特殊的优越性: 阻塞、压缩以及热平衡可望达到最大程度, 初始的入射动能能够较好地储存在一个单独的“源”中, 这就大大地简化了碰撞动力学, 减弱了表面效应<sup>[17]</sup>. 实验与理论(BUU和QMD模型)研究表明, 核的径向膨胀流具有如下特性: 与碎片的质量成正比; 随着碰撞参数的减小或入射能量的升高而增大; 对核物质的不可压缩系数不敏感; 较敏感地依赖于核子的有效质量  $m^*/m$ ; 对碰撞系统的核子数不敏感. 可见径向膨胀流与在平面的横向集体流有很大的差别.

本文通过利用同位旋相关的量子分子动力学(IQMD)模型对系统 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ 的径向膨胀流的研究, 发现径向膨胀流存在着强烈的同位旋相关性, 并发现这种相关性主要是由核子-核子碰撞截面的同位旋相关所造成的, 而与对称能几乎无关.

## 2 模型和方法

在本文中使用的是IQMD模型<sup>[13,22,23]</sup>, 它包括了同位旋相关的核子-核子碰撞截面、对称能项、库仑势及同位旋相关的泡利阻塞. 另外, 在初始化过程中也严格地区分了中子和质子. IQMD模型中的平均场可以参数化为

$$U(\rho, \tau_z) = \alpha \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) + \beta \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma + \frac{1}{2} (1 - \tau_z) V_C + C \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho_0} \tau_z + U^{\text{Yuk}}, \quad (1)$$

式中  $\rho_0 = 0.16 \text{fm}^{-3}$ , 即正常核物质的饱和密度;  $\rho$ ,  $\rho_n$  和  $\rho_p$  分别是总的、中子的和质子的相互作用密度;  $\tau_z$  是同位旋自由度的第3分量, 对于中子和质子分别等于1和-1;  $V_C$  代表库仑势;  $U^{\text{Yuk}}$  为 Yukawa(表面)势; 参数  $\alpha$ ,  $\beta$  和  $\gamma$  的选择将采用所谓的软势(不可压缩系数  $K = 200 \text{MeV}$ ); 对称能强度系数  $C = 32 \text{MeV}$ .

对于碰撞系统 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ 和 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ , 在初始化过程中, 利用非线性相对论平均场理论(RMF)<sup>[24]</sup>得到的 $^{124}\text{Ba}$ 和 $^{124}\text{Sn}$ 的中子及质子密度分布, 抽样出稳定的基态核. 在非线性相对论平均场理论计算中使用了较新的参数NL3<sup>[25]</sup>, 这组参数对稳定核以及远离 $\beta$ 稳定线核的基态性质都能给出很好的描述. 同时, 为了构造碎片, 发展了一个同位旋相关的改进的合并模型<sup>[13,23,26]</sup>. 在这个模型中, 同时考虑了坐标、动量及碎片同位旋的限制, 最后, 为了排除非物理的线状集团, 还考虑了片的重构.

### 3 结果和讨论

一般来说, 在中心对称碰撞中, 碎片的平均动能  $\langle E_k \rangle$  可以分成 3 个部分, 即:

$$\langle E_k \rangle = \langle E_{th} \rangle + \langle E_{Coul} \rangle + \langle E_{rad} \rangle, \quad (2)$$

其中,  $\langle E_{th} \rangle$  表示随机的“热”的部分,  $\langle E_{Coul} \rangle$  为库仑排斥部分,  $\langle E_{rad} \rangle$  为集体运动部分, 即所谓的径向膨胀流. 如文献[17]所采用的方法一样, 前两个部分(“热 + 库仑”)可利用 WIX 程序<sup>[16]</sup> 进行计算

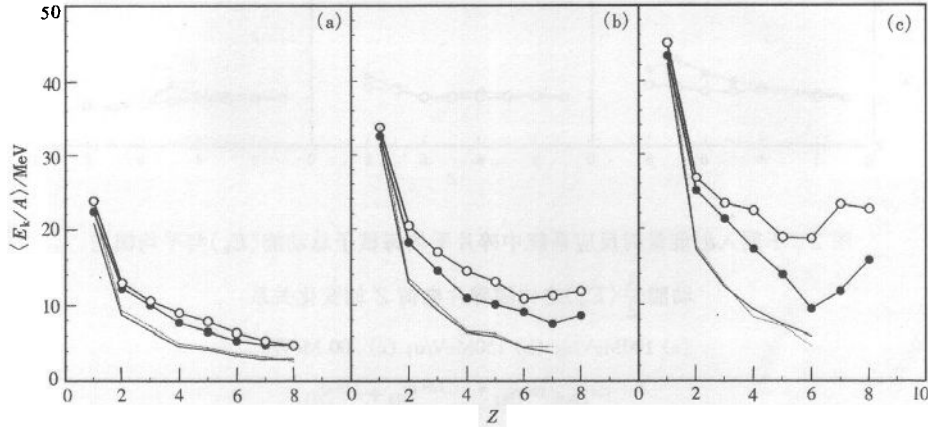


图 1 不同能量下碎片平均每核子总动能  $\langle E_k/A \rangle$  随碎片电荷  $Z$  的变化关系

(a) 100MeV/u; (b) 150MeV/u; (c) 200 MeV/u.

•  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ , IQMD; °  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ , IQMD;

—“热 + 库仑”(  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ ); ·····“热 + 库仑”(  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ ).

图 1(a), (b) 和 (c) 分别给出了入射能量为 100, 150 和 200 MeV/u 时, 系统  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  中碎片平均每核子总动能  $\langle E_k/A \rangle$  随碎片电荷  $Z$  的变化关系. 径向膨胀流的大小可以通过较重碎片的总动能减去“热 + 库仑”部分的动能而得到. 表 1 给出了不同入射能量下所提取的系统  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  的径向膨胀流及其差值  $\Delta$ . 从表 1 可以看到, 丰中子系统  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  的径向膨胀流系统性地小于系统  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  的径向膨胀流, 并且随着能量的增加变得更加明显. 同时, 还可以清楚地看到, 对于同一个碰撞系统, 径向膨胀流随着入射能量的增加而增加, 这与实验结果是一致的<sup>[19]</sup>.

表 1 系统  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  的径向膨胀流及其差值  $\Delta$  (单位: MeV)

入射能量	$^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$	$^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$	$\Delta$
100	3.06	2.59	0.47
150	6.90	4.60	2.30
200	11.94	6.95	4.99

为了检查碰撞系统是否达到热平衡, 图 2(a), (b) 和 (c) 分别给出了入射能量为 100,

150 和 200 MeV/u 时, 系统  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  中碎片平均每核子总动能  $\langle E_k/A \rangle$  与平均横向动能  $\frac{3}{2}\langle E_v/A \rangle$  之比随碎片电荷  $Z$  的变化关系, 这里,  $\langle E_v \rangle$  定义为

$$\langle E_v \rangle = \frac{\langle p_x^2 + p_y^2 \rangle}{2A} \quad (3)$$

从图 2 可以看到, 对不同碎片, 比值  $\langle E_k \rangle / \frac{3}{2}\langle E_v \rangle$  基本上都等于 1, 这表明碰撞系统已被完全阻塞, 碎片都来自于一个热的、压缩的系统.

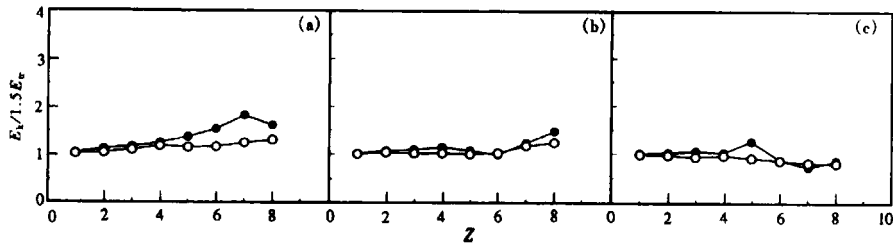


图 2 不同入射能量时反应系统中碎片平均每核子总动能  $\langle E_k \rangle$  与平均横向

动能  $\frac{3}{2}\langle E_v \rangle$  之比随碎片电荷  $Z$  的变化关系

(a) 100 MeV/u; (b) 150 MeV/u; (c) 200 MeV/u.

○  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ ; ●  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ .

径向膨胀流的同位旋相关性似乎是来自于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性. 在以上的计算中, 我们采用的是实验提取的自由空间的核子-核子碰撞截面. 在这组截面中, 当入射能量小于 300 MeV/u 时, 中子-质子的碰撞截面大约是中子-中子(或质子-质子)碰撞截面的 3 倍, 这就导致了在丰中子碰撞系统中核子-核子碰撞相对较弱, 从而产生较小的径向膨胀. 正如文献[13]中所提到的, 核子-核子碰撞随着入射能量的增加而变得更加重要, 相应地同位旋效应更加明显(当入射能量小于 300 MeV/u 时), 这与表 1 的结果是一致的.

为了探索核子-核子碰撞截面与对称能对径向膨胀流的影响, 在入射能量  $E = 150$  MeV/u 时, 图 3(a)和(b)分别给出了反应系统  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  在不同情况下的平均每核子横向动能  $\frac{3}{2}\langle E_v/A \rangle$  随碎片电荷  $Z$  的变化关系. 从图 3 中可以清楚地看到, 重碎片平均横向动能敏感地依赖于核子-核子碰撞截面而与对称能几乎无关. 另外还可以看到, 实验的参数化截面  $\sigma_{\text{exp}}$  对系统  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  的影响要大于对系统  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  的影响, 这是由于核子-核子碰撞截面的同位旋相关所导致的.

对于实验的参数化截面  $\sigma_{\text{exp}}$ , 当碰撞能量大于 500 MeV/u 时, 同位旋相关性已基本消失. 在入射能量  $E = 600$  MeV/u 时, 图 4 给出了反应系统  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  和  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  中碎片平均每核子总动能  $\langle E_k/A \rangle$  随碎片质量  $A$  的变化关系. 可以看到, 两个反应系统中碎片动能的差别已经消失, 这就进一步证实了径向膨胀流的同位旋相关性主要是由核子-核子碰撞截面的同位旋相关所导致的.

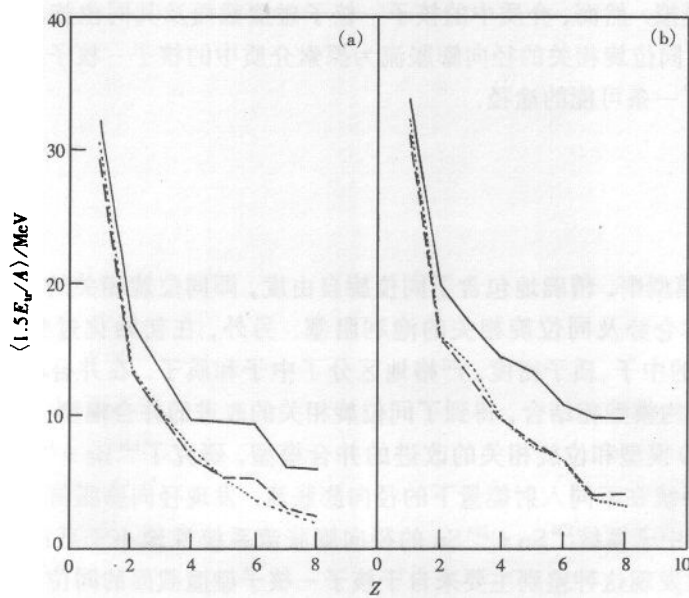


图 3 反应系统 $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ (a)和 $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ (b)在不同情况下的平均每核子横向动能 $\frac{3}{2}\langle E_{\perp} / A \rangle$ 随碎片电荷  $Z$  的变化关系  
 —  $C = 32\text{MeV} + \sigma_{\text{exp}}$ ; - - -  $C = 32\text{MeV} + \sigma_{\text{CUG}}$ ; ·····  $C = 0\text{MeV} + \sigma_{\text{CUG}}$ .

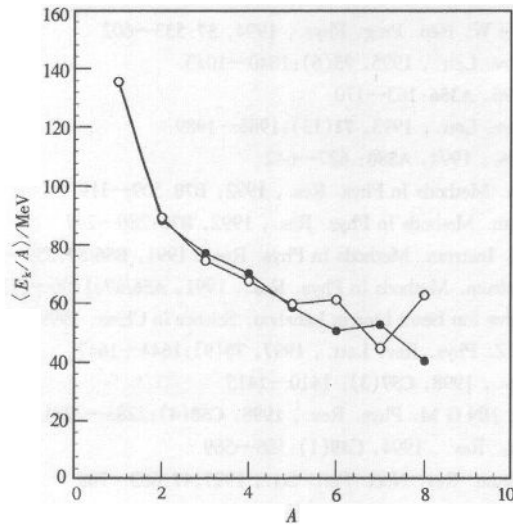


图 4 入射能量  $E = 600\text{MeV}/u$  时, 反应系统中碎片平均每核子总动能 $\langle E_k / A \rangle$ 随碎片质量  $A$  的变化关系  
 •  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$ ; °  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$ .

在本文的计算中, 采用的都是自由空间的核子-核子碰撞截面, 介质效应仅仅是通

过泡利阻塞来模拟. 然而, 介质中的核子-核子碰撞截面及其同位旋相关性可能具有强烈的密度相关. 同位旋相关的径向膨胀流为探索介质中的核子-核子碰撞截面及其同位旋相关性提供了一条可能的途径.

## 4 总结

在 IQMD 模型中, 精确地包含了同位旋自由度, 即同位旋相关的核子-核子碰撞截面、对称能项、库仑势及同位旋相关的泡利阻塞. 另外, 在初始化过程中使用非线性的 RMF 理论得到的中子、质子密度, 严格地区分了中子和质子. 在并合模型中区分了中子和质子, 并与重构模型相结合, 得到了同位旋相关的改进的并合模型.

利用 IQMD 模型和位旋相关的改进的并合模型, 研究了  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  和  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  两个对心碰撞系统在不同入射能量下的径向膨胀流. 发现径向膨胀流存在着强烈的同位旋相关性, 即丰中子系统  $^{124}\text{Sn} + ^{124}\text{Sn}$  的径向膨胀流系统性地小于系统  $^{124}\text{Ba} + ^{124}\text{Ba}$  的径向膨胀流. 同时发现这种差别主要来自于核子-核子碰撞截面的同位旋相关性而几乎与对称能无关.

本文首次预言了径向膨胀流的同位旋相关性, 为探索介质中的核子-核子碰撞截面及其同位旋相关性提供了一条可能的实验途径. 同时使人们对径向膨胀流的产生机制有了更深一步的了解.

## 参考文献(References)

- 1 Peilert G, Stocker H, Greiner W. Rep. Prog. Phys., 1994, **57**:533—602
- 2 Pochodzalla J et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**(6):1040—1043
- 3 ZHANG F S. Z. Phys., 1996, **A356**:163—170
- 4 Westfall G D et al. Phys. Rev. Lett., 1993, **71**(13):1986—1989
- 5 ZHOU H B et al. Nucl. Phys., 1994, **A580**: 627—642
- 6 Kubo T et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res., 1992, **B70**:309—319
- 7 Geissel H et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res., 1992, **B70**:286—297
- 8 Mueller A C, Anne R. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res., 1991, **B56/57**:559—563
- 9 Sherrill B M et al. Nucl. Instrum. Methods In Phys. Res., 1991, **A56/57**:1106—1110
- 10 ZHAN W L et al. Radioactive Ion Beam Line in Lanzhou, Science in China, 1999(in press)
- 11 LI B A, KO C M, REN Z Z. Phys. Rev. Lett., 1997, **78**(9):1644—1647
- 12 Colonna M et al. Phys. Rev., 1998, **C57**(3): 1410—1415
- 13 CHEN L W, ZHANG F S, JIN G M. Phys. Rev., 1998, **C58**(4):2283—2291
- 14 LI G Q, Machleidt R. Phys. Rev., 1994, **C49**(1):566—569
- 15 Reisdorf W, Ritter H G. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., 1997,**47**:663—709
- 16 Randrup J. Comput. Phys. Commun., 1993, **77**:153—166
- 17 Jeong S C et al. Phys. Rev. Lett., 1994, **72**(22):3468—3471
- 18 Hsi W C et al. Phys. Rev. Lett., 1994, **73**(25):3367—3370
- 19 Lisa M A et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **75**(14):2662—2265
- 20 Bauer W et al. Phys. Rev., 1993, **C47**(5):R1838—R1841
- 21 ZENG X H, GE L X. Z. Phys., 1996, **A354**:317—319
- 22 GHEN L W et al. J. Phys., 1997, **G23**:211—218
- 23 CHEN LieWen et al. High Energy Phys. and Nucl. Phys. (in Chinese), 1998, **22**(11):1035—1041

(陈列文等. 高能物理与核物理, 1998, 22(11):1035—1041)

24 ZHU Z Y et al. Phys. Lett., 1994, B328:1—8

25 Lalazisis G A, Konig J, Ring P. Phys. Rev., 1997, C55(1):540—543

26 ZHANG F S, Suraud E. Phys. Rev., 1995, C51(6):3201—3210

### Isospin Effects on Radial Expansion Flow\*

CHEN LieWen<sup>1,2</sup> ZHANG FengShou<sup>1,2,3</sup> JIN GenMing<sup>1,2</sup>

LIU JianYe<sup>1,2</sup> ZHU ZhiYuan<sup>1,4</sup>

1(Center of Theoretical Nuclear Physics, National Laboratory of Heavy Ion Accelerator, Lanzhou 730000, China)

2(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

3(CCAST (World Laboratory) Beijing 100080, China)

4(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

**Abstract** Within the framework of an isospin-dependent quantum molecular dynamics model which includes isospin-dependent symmetry energy Coulomb energy, nucleon-nucleon cross sections, Pauli blocking, and initialization, we have shown that there is a strong isospin dependence of the radial expansion flow from the symmetric central collisions at incident energies of a few hundred MeV per nucleon. It is found that the more neutron-rich system exhibits smaller radial expansion flow, which is shown to result from the isospin dependence of nucleon-nucleon cross sections and to be independent of the nuclear symmetry energy. It suggests that the experimental measurement of the radial expansion flow for reaction systems with different ratios of neutron to proton provide a novel method for determining the isospin dependent in-medium nucleon-nucleon cross sections.

**Key words** isospin-dependent QMD model, radial expansion flow, nucleon-nucleon cross sections, symmetry energy

---

Received 16 December 1998

\* Project supported by National Natural Science Foundation of China(19609033,19875068,19847002), Science Foundation of The Chinese Academy of Sciences and Science Foundation of The Chinese Educational Commission